

CLIMESTIM

Un outil simplifié et opérationnel pour estimer les consommations de climatisation des bâtiments tertiaires à La Réunion et en métropole

Tâche 2 Retour d'expérience sur la climatisation centralisée en bâtiments tertiaires bureaux

Production 2.1 : Synthèse des résultats de mesure à La Réunion

septembre 2025

rédigé par 

Floriane MERMOUD floriane.mermoud@fmde.re 0693 20 77 44

Le projet CLIMESTIM est lauréat de l'appel à projets de recherche ADEME « Bâtiments Responsables » 2022.

Référente ADEME : Céline LARUELLE celine.laruelle@ademe.fr 04 93 95 72 53



Table des matières

NOMENCLATURE	3
<u>I. INTRODUCTION</u>	4
1. CADRE DU PROJET CLIMESTIM	4
2. CARACTERISTIQUES DES SITES ETUDIES	5
A. METHODOLOGIE	5
<u>II. CARACTERISATION DE LA CLIMATISATION A EAU GLACEE</u>	8
1. DEMANDE DE FROID	8
A. SIGNATURE ENERGETIQUE	8
B. MONOTONE DE FROID	8
C. TEMPERATURES DE DISTRIBUTION	10
D. TEMPERATURES DE CONSIGNE	10
2. EQUIPEMENTS DE PRODUCTION DE FROID A EAU GLACEE	11
A. DIMENSIONNEMENT	11
B. PERFORMANCES INTRINSEQUES	13
3. BILAN ENERGETIQUE SUR LES SITES ETUDIES	16
A. CONSOMMATIONS SPECIFIQUES	16
B. REPARTITION DE LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DE CLIMATISATION	16
C. CONSOMMATIONS EN INOCCUPATION	18
<u>III. CARACTERISATION DE LA CLIMATISATION PAR VRV</u>	19
1. DEMANDE ELECTRIQUE	19
A. SIGNATURE ELECTRIQUE	19
B. MONOTONE ELECTRIQUE	20
C. TEMPERATURES DE CONSIGNE	20
2. EQUIPEMENTS DE PRODUCTION DE FROID PAR VRV	21
A. DIMENSIONNEMENT	21
B. PROFILS DE FONCTIONNEMENT	22
3. BILAN ENERGETIQUE SUR LES SITES ETUDIES	24
A. CONSOMMATIONS SPECIFIQUES	24
B. CONSOMMATIONS EN INOCCUPATION	24
<u>IV. COMPARAISON ENTRE LES DEUX TECHNOLOGIES</u>	26
1. PERFORMANCES RESPECTIVES	26
2. CARACTERISTIQUES D'UTILISATION DE CHAQUE TECHNOLOGIE	27

Nomenclature

Abréviations

EG	Eau glacée
GEG	Groupe d'eau glacée
GTC	Gestion Technique centralisée
STD	Simulation Thermique Dynamique
VC	Ventilo-convecteur
VRV	Variable Refrigerant Volume (climatisation à détente directe)

Surfaces

SDP	Surface de plancher	SDP = surface intérieure hors épaisseur des murs, parkings, locaux techniques, cages d'escaliers
SUB	Surface utile brute	SUB = SDP – circulations verticales (ascenseurs)
SUN	Surface utile nette	SUN = surface de bureaux + salles de réunion + autres espaces de travail = SUB – circulations horizontales (couloirs, halls, paliers d'escaliers et d'ascenseurs, etc.) – sanitaires – parties communes (cafétéria, salle de pause, etc.)

Indicateurs de Performances

EER	Energy Efficiency Ratio	$EER = \frac{kWf \text{ produits}}{kWe \text{ absorbés}}$
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio	$SEER = \frac{kWhf \text{ produits}}{kWh \text{ consommés}} \text{ sur une période donnée}$

Unités et sigles

ΔT	Tretour EG – Tdépart EG
We, kWe	watt, kilowatt électrique (puissance)
Wf, kWf	watt, kilowatt froid (puissance)
kWf _{inst}	kilowatt froid installé (puissance installée)
kWhe, MWhe	kilowattheure, mégawattheure électrique (énergie)
kWhf, MWhf	kilowattheure, mégawattheure froid (énergie)

I. INTRODUCTION

1. Cadre du projet CLIMESTIM

Dans la continuité des projets SWACool¹ et Tropiclim², l'objectif du projet CLIMESTIM était d'établir un moteur de calcul « réaliste » de la demande de froid ET d'électricité liée à la climatisation d'un bâtiment tertiaire en fonction de ses caractéristiques, basé sur des résultats de mesure couplés à une approche STD.

Dans le cadre du projet, un travail symétrique a été mené à La Réunion et en métropole – où on retrouve les mêmes problématiques concernant le poids croissant des consommations liées à la climatisation – avec deux outils distincts (deux moteurs de calcul différents adaptés à des climats et des pratiques différentes) mais basés sur une méthodologie générale commune.

La cible de l'outil est les bâtiments équipés de systèmes de climatisation centralisés équipés de GEG ou de systèmes VRV applicables dans les bâtiments tertiaires de bureaux (hors split-system), typiquement d'une surface supérieure à quelques centaines de m². L'objectif est particulièrement de constituer un outil d'accompagnement dans le cadre de l'application du décret tertiaire.

L'outil s'adresse prioritairement aux maîtres d'ouvrage (soient les acteurs soumis au décret tertiaire) et à leurs partenaires : il a été conçu pour être à la fois facile d'utilisation et complet et permet :

- d'estimer la consommation de froid ET d'électricité liée à la climatisation d'un bâtiment tertiaire moyennant un minimum de paramétrage
- d'évaluer les gains potentiels lors de la mise en œuvre d'une action de performance énergétique

La particularité de l'outil est qu'il prend en compte les dérives d'usage et de fonctionnement (ex : fonctionnement 24h/24, température de consigne trop basse, surdimensionnement du GEG et de la pompe de distribution, etc.), ce que ne font pas les outils existants basés exclusivement sur de la simulation. Or ces dérives ont un impact considérable sur les consommations au final comme l'a mis en évidence le projet SWACool.

En termes de méthodologie, l'outil se base sur des résultats de mesure sur une année (4 bâtiments équipés de GEG et 4 bâtiments équipés de VRV, à La Réunion comme en métropole, soient 16 bâtiments en tout) couplés à des résultats de simulation.

Le présent rapport synthétise le retour d'expérience obtenu sur les 8 bâtiments mesurés à La Réunion en termes de caractérisation des sites et des pratiques de travail.

¹ Projet SWACool « Potentiel de réduction de la demande de froid en climat tropical et optimisation du raccordement des bâtiments à un réseau de froid vertueux », lauréat de l'APR ADEME « Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020 », 3^{ème} édition, Green Tech/Enertech/LEU Réunion/Université de La Réunion, 2016-2020, <https://greentech.re/project/projet-swacool-finalise/>

² Projet Tropiclim « Favoriser l'émergence de la climatisation efficace dans le tertiaire à La Réunion », lauréat de l'AP11 PACTE « Améliorer la qualité de la construction dans les territoires ultra-marins », Green Tech/Enertech, 2018-2020, <https://www.caue974.com/en/portail/356/mediatheque/51329/tropiclim.html>

2. Caractéristiques des sites étudiés

a. Méthodologie

8 bâtiments de bureaux ont été instrumentés dans chaque territoire, sélectionnés pour avoir une répartition variée en termes géographique, architectural, taille, type de climatisation (par eau glacée ou par VRV), etc.

L'instrumentation a concerné :

- la consommation électrique totale du bâtiment
- la production d'eau glacée (consommation électrique) *pour les sites climatisés par eau glacée*
- la distribution d'eau glacée (débit EG et températures départ/retour, consommation électrique de la pompe de distribution) *pour les sites climatisés par eau glacée*
- les unités extérieures de production de froid (consommation électrique) *pour les sites climatisés par VRV*
- un échantillon de terminaux/unités intérieures (consommation électrique)
- le confort thermique dans quelques locaux choisis (température/hygrométrie)
- données météorologiques, mesurées ou tirées de bases de données disponibles (ensoleillement direct/diffus, température et hygrométrie extérieure)

L'instrumentation s'est étalée sur une année complète (à défaut une saison complète) avec un pas de temps d'enregistrement de 10 min. Les données mesurées ont permis de caler les modèles de simulation thermique dynamique proposés dans le cadre du projet sur les 4 bâtiments climatisés par eau glacée dans chaque territoire.

La Figure 1 montre la répartition géographique et le Tableau 1 regroupe quelques caractéristiques des sites étudiés.

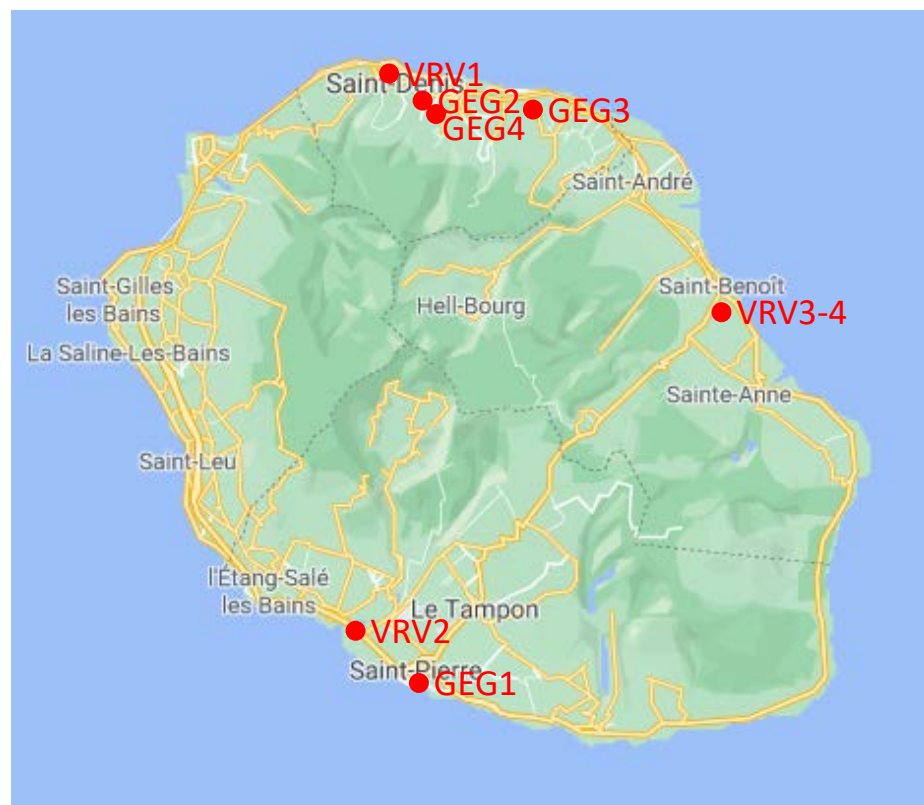


Figure 1 Emplacement des sites étudiés

Tableau 1 Caractéristiques des sites étudiés

Réunion	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
période mesure	02.2023-01.2024	12.2022-06.2023	06.2024-05.2025	12.2024-05.2025
type maître d'ouvrage	public	public	privé	privé
localisation	St Pierre	St Denis	Ste Clotilde	Ste Marie
type de bâtiment	compact (6 étages)	3 bâtiments, moyennement compacts (2-3-4 étages)	moyennement compact (3 étages)	peu compact (2 étages)
SUB	3758 m ²	3078 m ²	4000 m ²	1370 m ²
surface climatisée	2718 m ²	1843 m ²	3876 m ²	1200 m ² (890 m ² *)
mise en service clim	2022	2008	2022	2014
GTC	non	oui	non	non
nombre de bureaux	zone d'accueil public, 30 bureaux individuels et 20 open space	90 bureaux	8 locataires et 1 restaurant	NC
toiture isolée	oui	oui	oui	NC
protections solaires	brise-soleil ajourés	brise-soleil fixes	non, films solaires	casquettes solaires et joues
brasseurs d'air	oui	non	non	non
CTA air neuf	non	oui	non	non
débit air neuf	1800 m ³ /h	4200 m ³ /h	NC	4000 m ³ /h
période de climatisation	toute l'année	coupure mi-juin à fin novembre	toute l'année	fin mai à début novembre
profil de climatisation	coupure GEG nuits et we	coupure GEG et VC nuits, we, vacances	coupure GEG nuits et we	24h/24
puissance froide installée	271 kWf	160 kWf	380 kWf	149 kWf
production	1 GEG Carrier, 2 étages	1 GEG Trane, 4 étages	1 GEG Carrier, 6 étages	1 GEG Lennox, 4 étages
distribution EG	débit fixe, 48 m ³ /h	débit fixe, 23 m ³ /h	débit variable, 24-96 m ³ /h	débit fixe, 21 m ³ /h
terminaux	86 cassettes, 18 VC gainables, 6 plafonniers	90 cassettes, 2 VC muraux	185 cassettes	58 VC

* durant la période de mesure, une partie des locaux du site GEG4 n'étaient pas occupés ce qui amène à une surface climatisée de 890 m²

Réunion	VRV1	VRV2	VRV3	VRV4
période mesure	01-12.2024	12.2023-11.2024	02.2024-01.2025	02.2024-01.2025
type maître d'ouvrage	public	public	public	public
localisation	St Denis	St Pierre	St Benoit	St Benoit
type de bâtiment	compact (étage d'un bâtiment)	peu compact (2 étages)	peu compact (4 étages avec grand patio central)	moyennement compact (3 étages)
SUB	1030 m ²	1500 m ²	2300 m ²	1600 m ²
surface climatisée	980 m ²	1180 m ²	1110 m ²	1200 m ²
nombre de bureaux	zone d'accueil public, 10 bureaux, grand open space	62 bureaux	60 bureaux	35 bureaux
toiture isolée		oui	oui	oui
protections solaires	non	non, films solaires	brise-soleil fixes	joues
brasseurs d'air	non	oui	non	non
CTA air neuf	non	non	non	non
débit air neuf	NC	2025 m ³ /h	2840 m ³ /h	4115 m ³ /h
mise en service clim	2015	2020	2012	2019
supervision	non	oui	oui	oui
période de climatisation	toute l'année	toute l'année	toute l'année	toute l'année
profil de climatisation	24h/24	coupure UE et UI nuits et we	24h/24	coupure UE nuits et we
puissance froide installée	105 kWf	124 kWf	128 kWf	145 kWf
production	3 VRV Hitachi	4 VRV Mitsubishi Electric	4 VRV Daikin	3 VRV Gree
terminaux	28 UI plafonniers, 15 UI murales	63 UI murales	63 UI plafonniers, 3 UI murales	53 UI plafonniers

On note que :

- Les sites sont tous en zone côtière (=zone où on trouve les bâtiments tertiaires climatisés à La Réunion).
- Les surfaces des sites étudiés vont de 1000 à 4000 m² de surface climatisée (=cibles du décret tertiaire), avec des puissances froides installées allant de 100 à 400 kWf. Les surfaces des sites en VRV sont plus faibles que celles des sites en EG (1000 à 1200 m² contre 1200 à 4000 m² climatisés). En effet d'un côté les GEG nécessitent une taille critique pour être pertinents, et de l'autre les VRV sont plus difficiles à mettre en œuvre sur des surfaces importantes (en lien avec les grandes quantités de fluide frigorigène qui doivent circuler dans le bâtiment).
- Les architectures des bâtiments sont plus ou moins compactes.
- 3 bâtiments ne disposent pas de protections solaires (et les protections solaires ne sont généralement pas optimisées sur les autres).
- Les années de mise en service de la climatisation vont de 2008 à 2022.
- 6 des 8 bâtiments sont climatisés toute l'année.
- Sur les 4 GEG, seul 1 fonctionne en permanence (les autres sont coupés pendant la nuit et le we). 1 seul GEG est équipé d'une pompe à débit variable. 1 seul site est équipé d'une GTC.
- 2 sites VRV ont mis en place une coupure en inoccupation, sur les 2 autres la climatisation continue de fonctionner si les usagers ne coupent pas leur unité intérieure. Une supervision (proposée par le fournisseur des VRV) est disponible sur 3 des 4 sites.

II. CARACTERISATION DE LA CLIMATISATION A EAU GLACEE

1. Demande de froid

La demande de froid d'un site est typiquement caractérisée par une puissance froide appelée assortie d'une température de départ EG, le tout en moyenne horaire sur une année.

a. Signature énergétique

L'appel de puissance froide d'un bâtiment est directement dépendant des conditions climatiques. La signature énergétique d'un bâtiment est typiquement définie comme la représentation de la puissance froide appelée en fonction de la température extérieure. Elle se trace en moyenne journalière afin de limiter la dispersion. Pour faciliter la comparaison, nous avons représenté la signature énergétique EG des 4 sites étudiés en Wf/m^2 climatisé (cf. Figure 2).

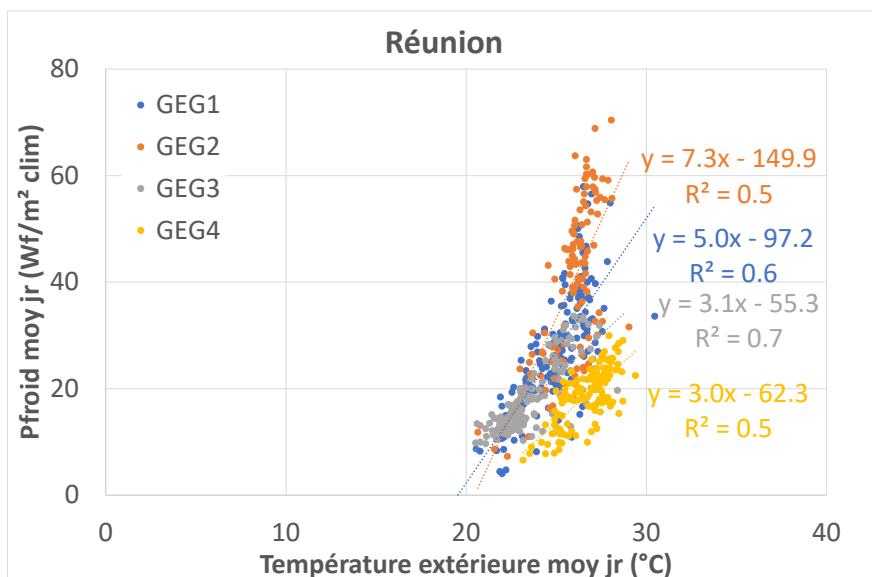


Figure 2 : Signatures énergétiques EG des 4 sites en Wf/m^2 climatisé

Observations :

- Les coefficients de détermination sont faibles (entre 0.5 et 0.7) même si peut tout de même identifier la tendance générale.
- Les pentes sont comprises entre 3 et 7 Wf/m^2 clim/K selon les sites.

b. Monotone de froid

Pour caractériser la structure de la demande de froid au cours de l'année, on la représente souvent en demande horaire classée sous la forme d'une courbe monotone (=puissances froides moyennes horaires sur une année classées de la plus grande à la plus petite). Afin de faciliter la comparaison, nous avons tracé la courbe monotone des 4 sites étudiés en rapportant la puissance appelée à la puissance maximale appelée sur l'année (cf. Figure 3).
NB : Nous n'avons pas considéré les 10 1^{ères} valeurs pour la détermination de la puissance maximale appelée afin de nous affranchir de phénomènes de régulation qui ne seraient pas représentatifs de la demande de froid réelle.



Figure 3 : Courbe monotone normalisée par rapport à la puissance maximale appelée sur l'année pour les 4 sites

Observations :

- La structure de la consommation est semblable au-dessus de 50% de Pf normalisée (sauf GEG3).
- Le GEG2 fonctionne seulement 1200 h/an (coupure en inoccupation + en hiver), GEG1 et GEG3 fonctionnent entre 2500 et 3000 h/an (climatisation toute l'année mais coupure en inoccupation) tandis que le GEG4 fonctionne 5000 h/an (fonctionnement 24h/24 mais coupure hivernale).
- Pour les 4 sites, on note un très faible nombre d'heures de fonctionnement à la puissance maximale (qui est inférieure à la puissance installée).

La Figure 4 compare les puissances froides appelées en moyenne sur le temps de fonctionnement et en maximum horaire sur chacun des sites :

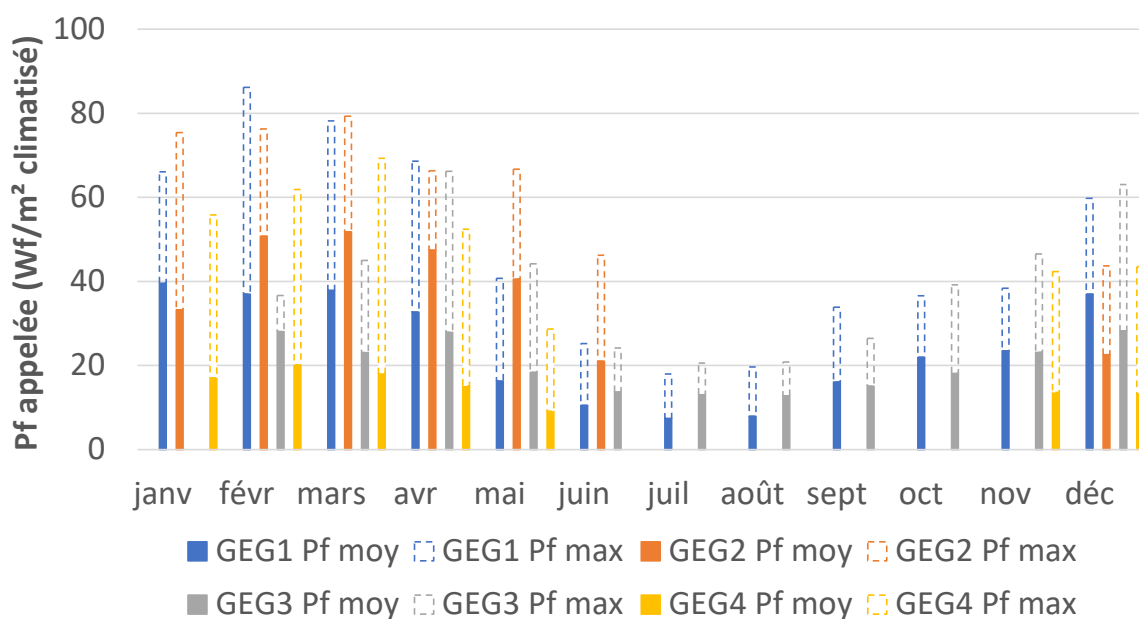


Figure 4 : Puissance froide appelée, en moyenne sur le temps de fonctionnement et en max sur le mois (Wf/m² climatisé)

Les puissances froides moyennes appelées sont comprises entre 20 à 50 Wf/m² climatisé en plein été, avec des pics ponctuels à 80 Wf/m² climatisé en moyenne horaire.

c. Températures de distribution

La Figure 4 présente les monotones de température de départ EG ainsi que les monotones des ΔT (Tretour EG – Tdépart EG) sur le réseau EG pour les 4 sites.

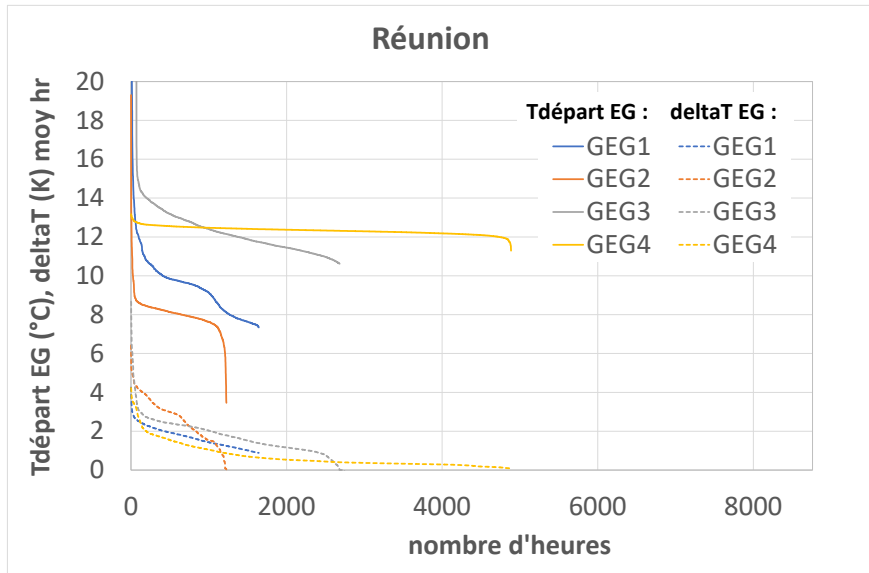


Figure 5 : Monotones de température de départ EG et ΔT EG pour les 4 sites

Observations :

- La température de départ EG ne varie pas beaucoup au cours de l'année : nous n'avons pas identifié de variation de la consigne de départ distribution en fonction de la température extérieure (loi d'eau).
- Les températures de départ EG sont étonnamment élevées pour 2 sites GEG3 (11-14°C) et GEG4 (12-13°C). Elles sont plus classiques pour GEG2 (7-9°C) et GEG1 (8-10°C).
- sur GEG1 et GEG4, les ΔT dépassent rarement 2K sur le réseau EG, ce qui est loin de la valeur de référence de 5K et traduit un surdimensionnement systématique de la pompe de distribution EG à débit fixe. GEG3 n'atteint pas des $\Delta T > 3K$ malgré que la pompe soit à débit variable (probablement à cause d'un surdimensionnement du GEG imposant un débit technique minimal élevé). C'est sur GEG2 que les ΔT les plus élevés (jusqu'à 4K) sont obtenus car la pompe de distribution est bien dimensionnée.

d. Températures de consigne

Des sondes de température intérieures ont été positionnées dans tous les bâtiments sur quelques bureaux pour apprécier la température ambiante (qui reflète la température de consigne) dans les zones climatisées.

Le Tableau 2 présente le nombre de bureaux instrumentés ainsi que le niveau de température indicatif observé pour chaque bâtiment.

Tableau 2 : Niveaux de températures indicatifs mesurés dans les différents bâtiments

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
nb bureaux	4	95 (GTC)	4	5
T° ambiante	26°C	26°C	26°C	27°C

Les niveaux de température relevés sont relativement homogènes d'un bâtiment à l'autre, **de l'ordre de 26 ou 27°C**. On ne peut cependant pas être sûrs que les bureaux instrumentés soient représentatifs de l'ensemble du bâtiment...

NB : Ces valeurs ont été utilisées pour le calibrage des modèles STD.

2. Equipements de production de froid à eau glacée

a. Dimensionnement

Le Tableau 2 regroupe les ratios spécifiques caractérisant le dimensionnement sur les 4 sites ainsi que les conséquences qui en découlent sur le fonctionnement observé des installations.

Tableau 3 : Ratios spécifiques de dimensionnement de la production EG et de la distribution et conséquences sur le fonctionnement de l'installation sur les 4 sites

Réunion		GEG1	GEG2	GEG3	GEG4	
ratios spécifiques						
Pfroide installée	Wf/m ² clim	100	87	98	124	
débit distribution nominal	m ³ /h/kWf _{inst}	0.18	0.14	<u>0.25</u> (variable)	0.14	
	m ³ /h/m ² clim	0.018	0.012	<u>0.025</u> (variable)	0.018	
conséquences						
production	Pfmax atteinte	Wf/m ² clim	86	79	48	71
	Pfmax représentative (10h> à cette valeur)	Wf/m ² clim	63	75	43	63
	surdimensionnement		1.6	1.2	2.3	2.0
	nb heures équivalentes à P _{installée}		657 h/an	616 h/an	552 h/an	422 h/an
	nb heures équivalentes à P _{max représentative}		1044 h/an	712 h/an	1255 h/an	1128 h/an
distribution	conso pompe distrib (mesuré)	We/m ³ /h	92	100	<u>110-115</u>	95
		We/kWf _{inst}	16	14	<u>11-14</u>	13
		We/m ² clim	1.6	1.2	<u>1.0-1.3</u>	1.7
	Tdépart EG		7.5-8.5°C	8-10°C	<u>11-14°C</u>	12-13°C
	Tretour EG		10-13°C	9-12°C	<u>13-15°C</u>	13-14°C
	ΔT		<3 degrés	1.5-4.5 degrés	<3 degrés	<2 degrés

valeurs soulignées : présence d'une variation de débit

Le ratio de puissance froide installée varie entre 87 et 124 Wf/m² climatisé. La puissance froide maximale représentative (10h en-dessus de cette valeur) est plutôt de l'ordre de 60-70 Wf/m² climatisé (43 Wf/m² climatisé pour GEG3, signe d'une occupation moindre ?). Le surdimensionnement entre la puissance installée et la puissance réellement nécessaire est compris entre 1.2 et 2.3 selon les sites. Le nombre d'heures de fonctionnement « équivalent pleine puissance » est un indicateur qui permet d'apprécier le niveau de surdimensionnement :

$$nb\ heures\ \acute{e}quiv\ Pleine\ Puissance = \frac{Energie\ totale\ sur\ l'ann\acute{e}e\ (kWhf)}{Puissance\ install\acute{e}e\ (kWf)}$$

De manière logique, il diminue lorsque le niveau de surdimensionnement augmente. Il devrait être d'au moins 1000 h/an pour une installation bien dimensionnée (dans le cas d'un fonctionnement annuel).

La Figure 6 présente les taux de charge moyens et en max horaire pour chaque mois :

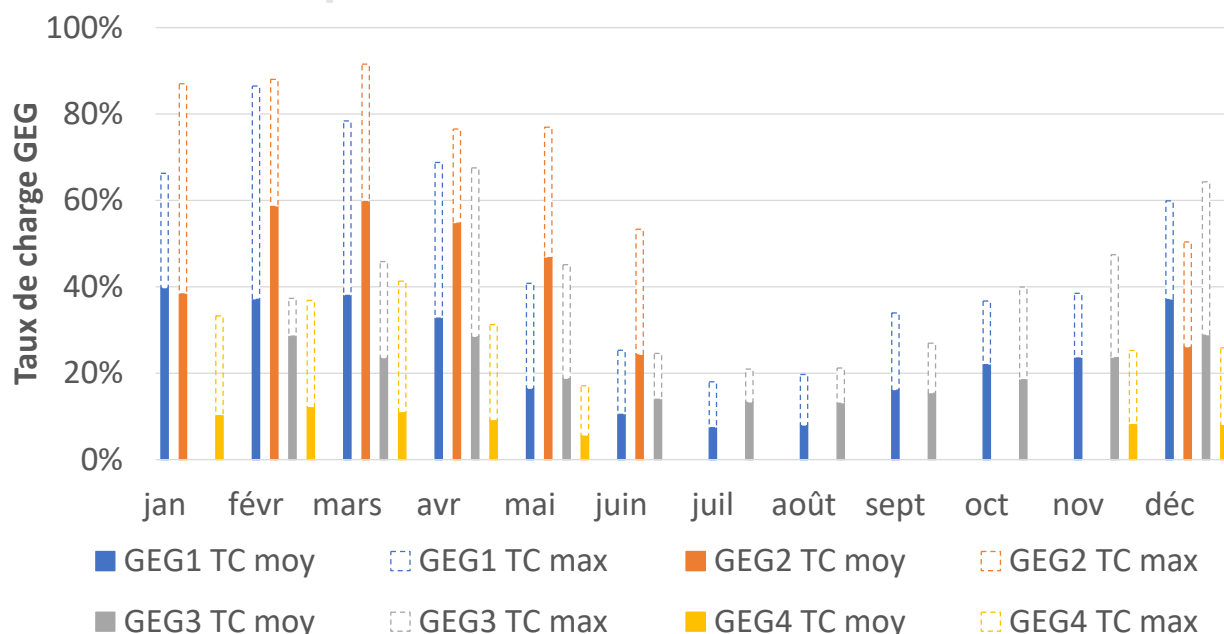


Figure 6 : Taux de charge mensuels moyens et max horaire pour les 4 sites

Les taux de charge moyens en fonctionnement sont compris entre 10 et 60% selon les mois, tandis que les taux de charge max sur l'année varient entre 40 et 90% selon les sites.

Seul GEG3 bénéficie d'une pompe de distribution à débit variable, les 3 autres sites sont équipés d'une pompe à débit fixe. Cependant, le suivi a montré que le débit variait peu au cours de l'année (entre 35 et 47 m³/h), ce qui est probablement en lien avec le surdimensionnement du GEG qui impose un débit technique minimum élevé.

Le ratio de débit de distribution s'étale entre 0.14 et 0.25 m³/h/kWf installé, et entre 0.012 et 0.025 m³/h/m² climatisé soit une variation d'un facteur 2 entre les sites. La puissance absorbée par la pompe de distribution (mesurée) augmente logiquement avec le débit délivré, et de manière relativement linéaire comme le montre la Figure 7.

NB : Les données pour le GEG3 (débit variable) apparaissent sous la forme d'un nuage de points tandis que les sites à débit fixe sont caractérisés par un point unique.

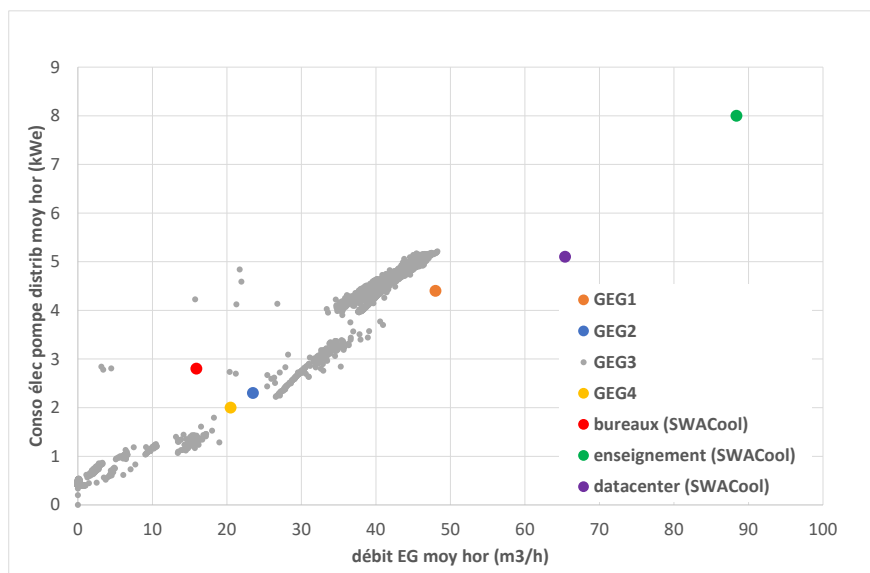


Figure 7 : Puissance absorbée par la pompe de distribution en fonction du débit de distribution pour les 4 sites de La Réunion (+ 3 sites étudiés dans le cadre du projet SWACool³)

Enfin, sur 3 des 4 sites les ΔT sur le réseau EG sont faibles (<2-3 degrés toute l'année), ce qui est loin de la valeur de référence de 5K et traduit un surdimensionnement systématique de la pompe de distribution par rapport à la demande de froid réelle, qui est partiellement à mettre en lien avec le surdimensionnement du GEG lui-même. Même le site équipé d'une pompe à débit variable ne parvient pas à atteindre des ΔT de 5 degrés. En revanche, sur le site GEG2 où la pompe de distribution semble bien dimensionnée ($0.012 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ climatisé à comparer aux $>0.018 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ climatisé sur les autres sites), les ΔT atteignent 4.5 degrés et la consommation de la distribution est bien maîtrisée ($1.2 \text{ We}/\text{m}^2$ climatisé).

b. Performances intrinsèques

Les performances de la production de froid ont été mesurées en continu sur les 4 sites. Elles sont caractérisées de manière instantanée par l'Energy Efficiency Ratio (EER) :

$$EER = \frac{\text{kWf produits}}{\text{kWe absorbés}}$$

L'EER des GEG a ainsi pu être déterminé de manière instantanée (moyenne horaire) sur une année complète. Il varie en fonction des paramètres de fonctionnement :

- Diminution de l'EER lorsque la différence entre la température d'évaporation et la température de condensation (ΔT_{prod}) augmente pour une même puissance froide fournie (effet thermodynamique) ; la température d'évaporation étant proche de la température de sortie du GEG et la température de condensation généralement liée à la température extérieure, les performances d'un GEG ont tendance à diminuer lorsque la température extérieure augmente.
- Diminution de l'EER avec le taux de charge du GEG ; d'une part car le fonctionnement n'est pas optimisé à faible charge (cyclages) mais surtout à cause des auxiliaires qui sont dimensionnés pour un fonctionnement à pleine charge et n'adaptent généralement pas leur fonctionnement aux faibles charges ; leur consommation est donc la même qu'à pleine charge mais leur impact sur l'EER est plus important car la puissance froide est plus faible qu'à pleine charge.

³ Retour d'expérience sur la climatisation des 4 bâtiments tertiaires étudiés à La Réunion – Livrable 3.1, Green Tech/LEU Réunion/Enertech, 49 p, septembre 2020, <https://greentech.re/wp-content/uploads/2023/07/SWACool-Livrable-3.1-Synthese-des-enseignements-Reunion-Green-Tech-sept-2020.pdf>

Nous avons représenté sur la Figure 26 les performances mesurées précédemment sur 3 sites dans le cadre du projet SWACool³ ainsi que sur les GEG1 et GEG2 étudiés dans le cadre du projet CLIMESTIM.

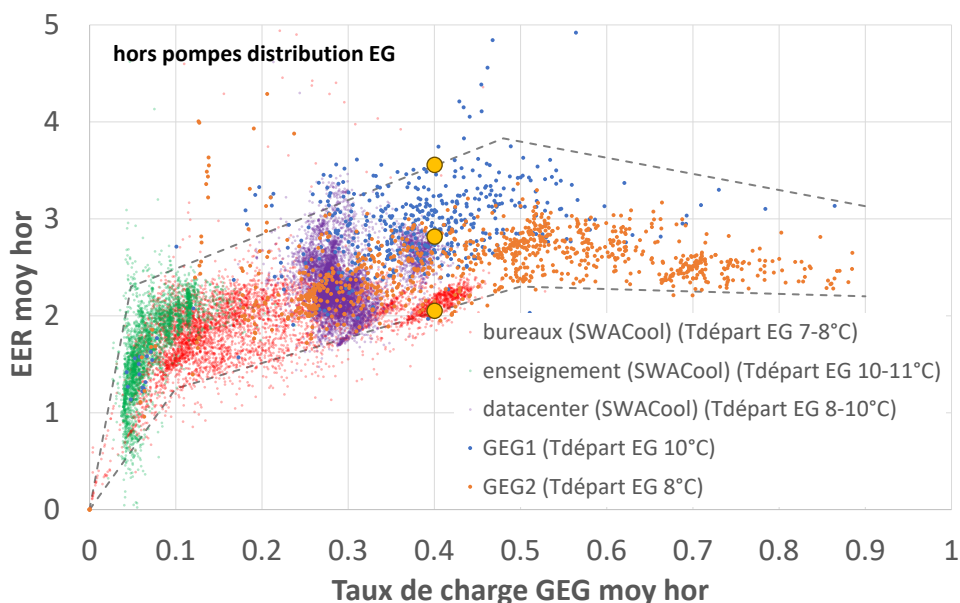


Figure 8 : Performances des GEG instrumentés sur 3 sites étudiés précédemment dans le cadre du projet SWACool et sur les GEG1 et GEG2 (moyenne horaire), en fonction du taux de charge

On note globalement une tendance des EER à augmenter avec le taux de charge même si la dispersion des valeurs est importante ; cependant l'influence individuelle de chacun des paramètres n'est pas évidente à distinguer sur les mesures car des faibles taux de charge sont également associés à une température extérieure – et donc un ΔT – plus faibles...

On peut cependant esquisser arbitrairement une « enveloppe » contenant la majorité des points qui permette de déterminer une fourchette d'EER à chaque niveau de taux de charge, qui sera tout de même plus précise que la valeur fixe unique qu'on lui donne habituellement.

On distingue 3 zones représentatives de 3 comportements distincts :

- zone entre 10 et 50% de taux de charge (la majorité des points) : augmentation de l'EER de 1.5-2.5 (10%) à 2.5-3.5 (50%)
- <10% : effondrement des performances à faible de taux de charge
- >50% : légère diminution des performances au-delà de 50% de taux de charge, contrairement à ce à quoi on pourrait s'attendre

A noter qu'un tel comportement a déjà été mis en évidence par Damien Casetta dans sa thèse⁴, dans laquelle il explique que le rendement du compresseur est maximal à 75% et non à 100% de taux de charge, ce qui explique qu'on observe un point d'inflexion (plutôt à 75% de taux de charge qu'à 50% selon lui).

Quoi qu'il en soit, l'enveloppe ainsi dessinée peut permettre de remonter à une valeur instantanée de l'EER en connaissant le taux de charge (au lieu de considérer une valeur forfaitaire fixée a priori). Cette approche par exemple peut se révéler utile pour réaliser des simulations de systèmes à un pas de temps horaire. *NB : La consommation de la pompe de distribution n'est pas considérée dans la caractérisation : il faut la rajouter à la consommation liée à la production EG pour obtenir la consommation électrique totale.*

⁴ Modèle d'aide à la conduite de réseaux de froid, Damien Casetta, MINES ParisTech, 313 p, octobre 2017

Influence de la dispersion des points

La dispersion des valeurs d'EER à même taux de charge est probablement due :

- au fait que les performances ne sont pas seulement dépendantes du taux de charge mais également de la température extérieure (comme discuté plus haut)
- aux différences de performances intrinsèques entre les GEG étudiés (de marque et d'ancienneté différentes)

Afin d'évaluer l'impact de la dispersion des points sur l'EER résultant, nous avons regardé sur un point spécifique (cf. point jaune sur la Figure 26) l'écart des valeurs extrêmes de l'enveloppe avec la valeur moyenne. Ainsi, pour un taux de charge de 40%, nous obtenons une valeur minimale de 2.1 et une valeur maximale de 3.2, soit un écart de l'ordre de $\pm 20\%$ avec la valeur moyenne : il paraît important de bien considérer une fourchette de valeurs plutôt qu'une valeur unique lorsqu'on exploitera cette caractérisation.

Influence de la température de départ EG

Lorsqu'on reporte les données des deux autres sites GEG3 et GEG4, il devient difficile de lire une tendance claire sur le graphe :

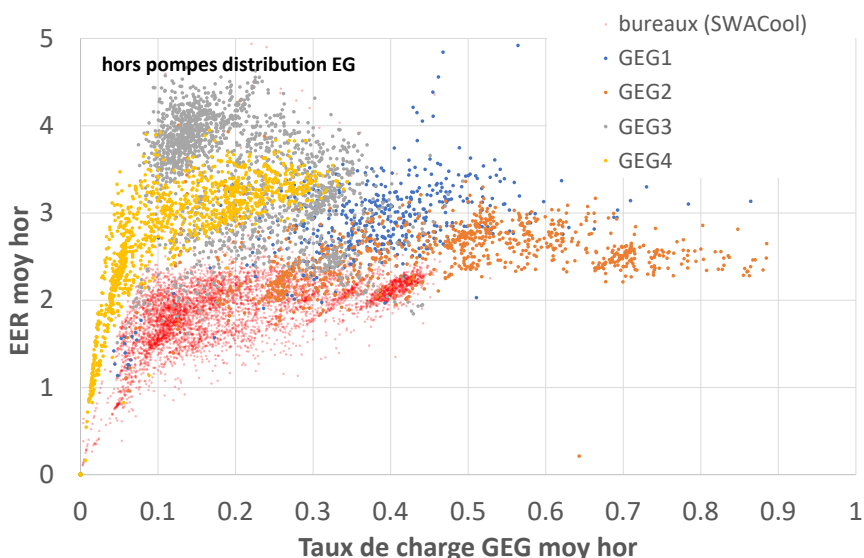


Figure 9 : Performances des GEG instrumentés sur les sites étudiés (moyenne horaire), en fonction du taux de charge

Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que les GEG3 et GEG4 fonctionnent à des niveaux de Tdépart EG plus élevés (11-14°C contre 7-10°C pour les autres sites) donc dans des conditions de fonctionnement plus favorables. Pour éviter un tel niveau de dispersion dans les fourchettes de valeurs, il paraît préférable d'établir une enveloppe différenciée pour les GEG fonctionnant à des niveaux de Tdépart plus élevées que les valeurs traditionnelles.

3. Bilan énergétique sur les sites étudiés

a. Consommations spécifiques

Pour permettre la comparaison des sites entre eux, nous avons regroupé les consommations spécifiques de froid EG et d'électricité dédiée à la climatisation EG sur les 4 sites dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Consommations spécifiques de froid EG et d'électricité dédiée à la climatisation sur les 4 sites

Réunion		GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
Profil climatisation		coupure GEG nuits et we, 365 jrs/an		coupure GEG et VC nuits, we, vacances, hiver	
		coupure GEG nuits et we, 365 jrs/an		24h/24, coupure hivernale	
Demande annuelle de froid EG	kWhf/m ² /an	66	53	54	71
Conso annuelle électricité (production+distribution EG)	kWhe/m ² /an	30	23	18	38
production EG	kWhe/m ² /an	26	21	14	27
distribution EG	kWhe/m ² /an	4.3	1.6	3.5	11.1
Conso annuelle terminaux	kWhe/m ² /an	4.6	9.3	5.4	5.2
SEER production seule		2.5	2.5	3.8	2.6
EER production horaire		2-3	2-3	2-4.5	2.5-3.5
taux de charge		<60%	jusqu'à 90%	<50%	<30%
SEER distribution incluse		2.2	2.4	3.1	1.9
SEER global (avec terminaux)		1.9	1.7	2.3	1.6
Conso spécifique distribution	kWhe/MWhf	66	30	64	157

en italique : valeurs estimées

On constate que :

- La demande de froid varie entre 53 kWh/m² climatisé/an (GEG2 avec coupure inoccupation et hivernale) et 71 kWh/m² climatisé/an (GEG4 avec coupure hivernale mais fonctionnement 24h/24). *NB : Les températures ambiantes observées sont proches sur les 4 sites d'études (cf. §II.1.d).*
- La consommation d'électricité nécessaire à la production EG varie entre 14 et 27 kWhe/m² climatisé/an, celle de la pompe de distribution EG entre 1.6 et 11.1 kWhe/m² climatisé/an. La consommation des terminaux a été estimée sur la base des mesures sur un échantillon plus ou moins important selon les sites. Elle varie entre 5 et 10 kWhe/m² climatisé/an. *NB : L'estimation de la consommation des terminaux n'est pas aussi précise que celle de la production ou la distribution car pour des raisons pratiques, on ne peut instrumenter qu'un échantillon dont on n'est pas sûr qu'il soit représentatif...*
- Les performances instantanées de la production EG (EER) varient majoritairement entre 2 et 4.5 selon les conditions de fonctionnement et les sites. **Le SEER annuel de la production EG seule est compris entre 2.5 et 3.8 selon les sites.** Le site avec les « meilleures » performances est GEG3 probablement grâce à la température de départ EG élevée.
- La prise en compte de l'électricité dédiée à la distribution fait perdre 0.1 à 0.7 au SEER selon les sites (élevé).
- En comptabilisant également les terminaux, le SEER tombe à des valeurs comprises entre 1.6 et 2.3.
- Enfin, la consommation spécifique de la distribution est comprise entre 30 kWhe/MWhf pour et 65 kWhe/MWhf pour GEG1 et GEG3. A noter la valeur de 157 kWhe/MWhf pour GEG4 (à cause du fonctionnement 24h/24).

b. Répartition de la consommation électrique de climatisation

La Figure 29 présente la répartition de la consommation d'électricité liée à la climatisation EG (hors terminaux) sur les 4 sites. La production EG est majoritaire sur tous les sites, la distribution représente entre 7 et 29% de la

consommation totale du GEG. NB : Pour une pompe bien dimensionnée, la consommation de la distribution devrait être comprise entre 5 et 10% de la consommation totale).

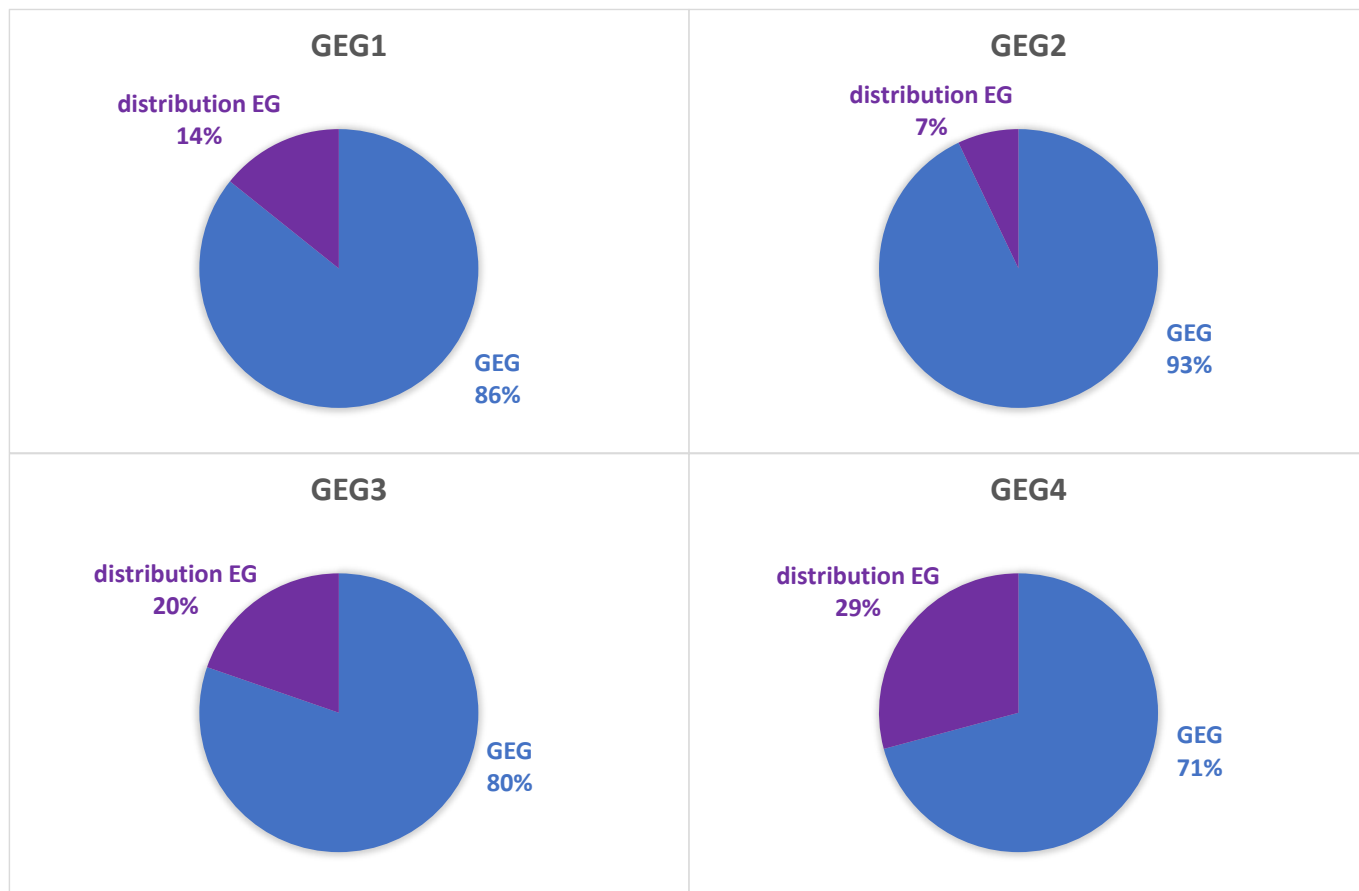


Figure 10 : Répartition de la consommation électrique dédiée à la climatisation EG (hors terminaux) sur les 4 sites

A noter que la consommation de la distribution de GEG3 atteint 20% de la consommation totale du GEG alors que le site est équipé d'une pompe à débit variable... Cela s'explique par plusieurs phénomènes :

- la consommation spécifique (mesurée) de la pompe est plus élevée que pour les autres sites (100-115 contre 90-100 We/m³/h)
- la consommation de « veille » (=lorsque le GEG est coupé) de la pompe est de l'ordre de 450 We
- le débit ne varie pas beaucoup dans l'année et le ΔT observé est inférieur à 3 degrés

Terminaux

La Figure 31 montre la consommation additionnelle estimée (en % de la consommation de la production+distribution EG) à considérer pour le fonctionnement des terminaux sur les 4 sites.

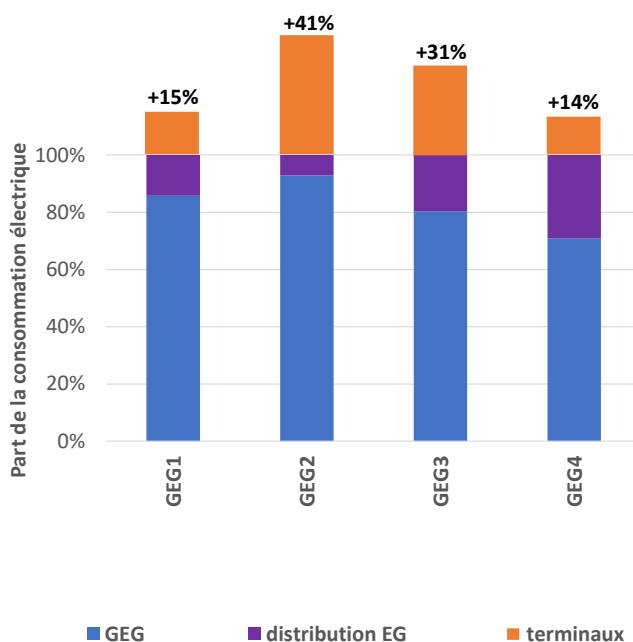


Figure 11 : Part de consommation électrique additionnelle (estimée) liée au fonctionnement des terminaux sur les 4 sites

On constate qu'il faut encore rajouter entre 15 et 40% de la consommation du GEG pour approcher la consommation totale de la climatisation EG. Il est intéressant de noter qu'on néglige souvent la consommation des terminaux car leur puissance est petite devant celle du GEG alors qu'en réalité elle est significative à cause de leur multiplicité et de leur fonctionnement continu (voire même parfois en périodes de coupure du GEG...).

c. Consommations en inoccupation

Le Tableau 5 présente les consommations de la climatisation en période d'inoccupation (nuits et we) :

Tableau 5 : Part de consommation de la climatisation en période d'inoccupation pour les 4 sites

Réunion	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4
Froid	8%	2%	1%	50%
Electricité	21%	11%	18%	57%
<i>dont GEG</i>	15%	2%	3%	50%
<i>dont pompe distribution</i>	15%	3%	21%	72%
<i>dont terminaux*</i>	61%	33%	56%	60%

*sur échantillon mesuré

On constate que :

- La consommation de froid en inoccupation représente la moitié de la consommation de froid totale si le GEG fonctionne 24h/24 (GEG4). La part de froid consommée en inoccupation est par contre faible sur les sites bénéficiant d'une coupure du GEG.
- La consommation de la pompe de distribution est parfois significative même si le GEG est coupé, c'est notamment le cas sur le GEG3 où la pompe de distribution consomme 450 We lorsqu'elle est à l'arrêt...?
- La part de consommation des terminaux en inoccupation est souvent élevée (>50% de la consommation totale), à cause des usagers qui laissent leur VC en marche mais surtout à cause d'une consommation de veille qui n'est pas négligeable (plusieurs 100 We mesurés sur les départs d'étage de VC). La seule façon de s'affranchir de cette consommation de veille est de couper l'ensemble des VC de manière centralisée le soir.

III. CARACTERISATION DE LA CLIMATISATION PAR VRV

1. Demande électrique

On ne peut pas caractériser la demande de froid sur les sites climatisés en VRV puisqu'on ne peut pas mesurer la puissance froide délivrée (détente directe) : on ne peut donc pas calculer les performances (EER/SEER).

a. Signature électrique

L'appel de puissance électrique des VRV est étroitement liée à la demande en froid qui dépend elle-même des conditions climatiques. Pour faciliter la comparaison, nous avons représenté la signature énergétique des 4 VRV étudiés en We/m^2 climatisé (cf. Figure 11).

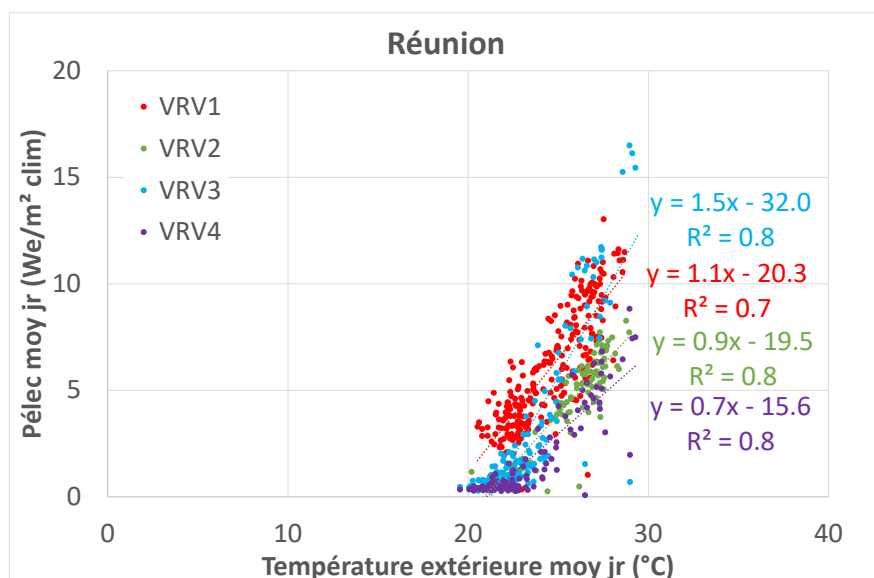


Figure 12 : Signatures énergétiques des 4 sites VRV en We/m^2 climatisé

Observations :

- Comme on peut s'y attendre, la demande électrique augmente avec la température extérieure.
- Etonnamment, les coefficients de détermination sont meilleurs que pour les sites EG (0.7-0.8 contre 0.5-0.7), ce qui traduit probablement le fait que les performances (EER) sont relativement constantes (elles ne dépendent pas du taux de charge), ce qui n'est pas surprenant pour des équipements à détente directe (dépourvus d'auxiliaires).
- Les pentes sont comprises entre 0.7 et 1.5 We/m^2 clim/K selon les sites, à mettre en parallèle avec les 3 à 7 Wf/m^2 clim/K sur les sites en EG, ce qui correspond à un EER de l'ordre de 4 à 5 si on considère les valeurs extrêmes.

b. Monotone électrique

Afin de faciliter la comparaison, nous avons tracé la courbe monotone des 4 sites étudiés en rapportant la puissance appelée à la puissance maximale appelée sur l'année (cf. Figure 3). *NB : Nous n'avons pas considéré les 10 1^{ères} valeurs pour la détermination de la puissance maximale appelée afin de nous affranchir de phénomènes de régulation qui ne seraient pas représentatifs de la demande de froid réelle.*



Figure 13 : Courbe monotone normalisée par rapport à la puissance maximale appelée sur l'année pour les 4 sites

Observations :

- La structure de la consommation est semblable pour VRV2, VRV3 et VRV4. On observe une nette différence pour VRV1, avec beaucoup plus d'heures de fonctionnement à puissance moyenne.
- Les 4 sites sont climatisés toute l'année, mais VRV2 et VRV4 sont coupés en inoccupation (<3000h de fonctionnement/an) ce qui n'est pas le cas de VRV3 (>4000h/an) et VRV1 (>6000h/an).
- Pour les 4 sites, on note un faible nombre d'heures de fonctionnement à la puissance maximale.

c. Températures de consigne

Des sondes de température intérieures ont été positionnées dans tous les bâtiments sur quelques bureaux pour apprécier la température ambiante (qui reflète la température de consigne) dans les zones climatisées.

Le Tableau 2 présente le nombre de bureaux instrumentés ainsi que le niveau de température indicatif observé pour chaque bâtiment.

Tableau 6 : Niveaux de températures indicatifs mesurés dans les différents bâtiments

	VRV1	VRV2	VRV3	VRV4
nb bureaux	3	3	2	2
T° ambiante	26°C	26°C	25°C	26°C

Les niveaux de température relevés sont relativement homogènes d'un bâtiment à l'autre, **de l'ordre de 25 ou 26°C**. On ne peut cependant pas être sûrs que les bureaux instrumentés soient représentatifs de l'ensemble du bâtiment...

2. Equipements de production de froid par VRV

a. Dimensionnement

Le Tableau 2 regroupe les ratios spécifiques caractérisant le dimensionnement sur les 4 sites ainsi que les conséquences qui en découlent sur le fonctionnement observé des installations.

Tableau 7 : Ratios spécifiques de dimensionnement de la production EG et de la distribution et conséquences sur le fonctionnement de l'installation sur les 4 sites

Réunion		VRV1	VRV2	VRV3	VRV4	
ratios spécifiques						
Pfroide installée	Wf/m ² clim	107	105	115	121	
Pélec nominale	We/m ² clim	32	27	33	35	
conséquences						
production	Pemax atteinte	We/m ² clim	25	22	44	33
	Pemax représentative (10h> à cette valeur)	We/m ² clim	23	21	43	23
	surdimensionnement		1.4	1.3	0.8	1.5
	nb heures équivalentes à Pinstallée		1532 h/an	872 h/an	1193 h/an	553 h/an
	nb heures équivalentes à Pmax représentative		2114 h/an	1152 h/an	903 h/an	844 h/an

Le ratio de puissance froide installée varie entre 105 et 121 Wf/m² climatisé tandis que la puissance électrique nominale correspondante est comprise entre 27 et 35 We/m² climatisé. La puissance électrique maximale représentative (10h en-dessus de cette valeur) est de l'ordre de 20-25 We/m² climatisé (sauf pour VRV3, qui enregistre des forts dépassements de la puissance électrique nominale sur des périodes significatives ??). Cette valeur est à mettre en relation avec les 60-70 Wf/m² climatisé mesurés sur les sites GEG, ce qui mènerait à un SEER de l'ordre de 3...

Le surdimensionnement est compris entre 1.3 et 1.5 selon les sites (hors VRV3).

La Figure 15 présente les taux de charge (calculés par rapport à la puissance électrique nominale) moyens et en max horaire pour chaque mois :

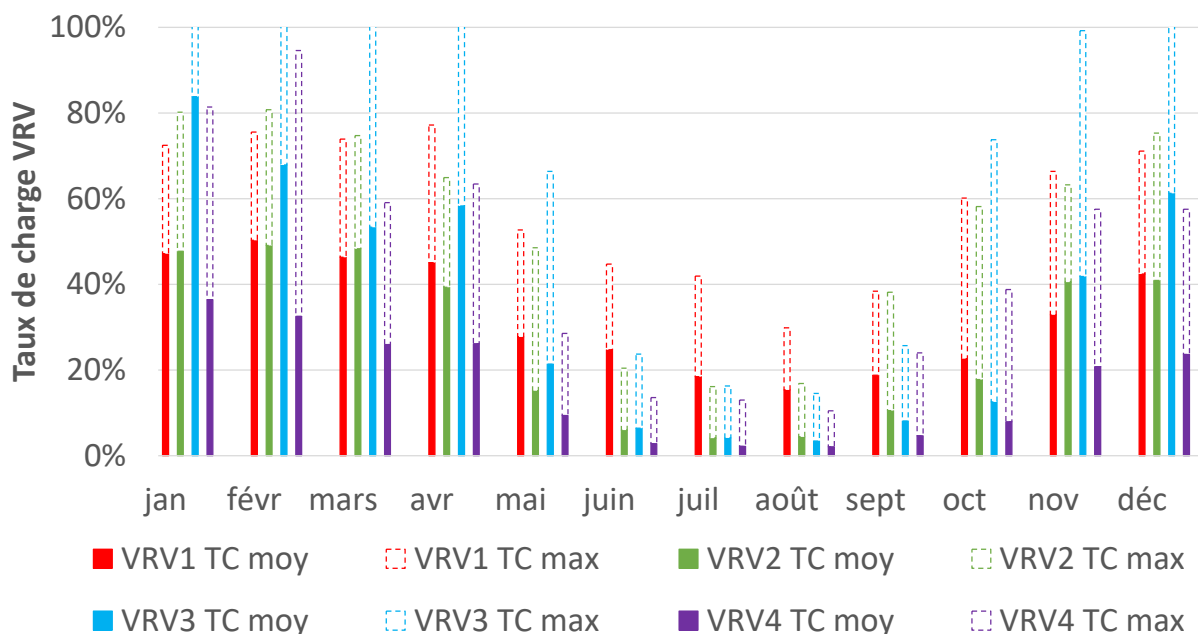


Figure 14 : Taux de charge mensuels moyens et max horaire pour les 4 sites

Les taux de charge moyens en fonctionnement sont compris entre 5 et 80% selon les mois, tandis que les taux de charge max sur l'année varient entre 75 et 85% selon les sites (hors VRV3).

NB : Sur VRV3, on observe de manière récurrente des pics de puissance allant jusqu'à 135% de la puissance nominale indiqué par le fournisseur, dont on n'a pas su expliquer la signification...

b. Profils de fonctionnement

Pour mieux illustrer le fonctionnement des VRV, nous avons représenté sur la Figure 13 les puissances absorbées par les unités extérieures à chaque heure de la journée moyennées sur tous les jours du mois (« jour moyen »), normalisées par rapport à la puissance maximale absorbée sur l'année.

NB : Seuls les jours de semaine (=où il y a de l'occupation) ont été pris en compte.

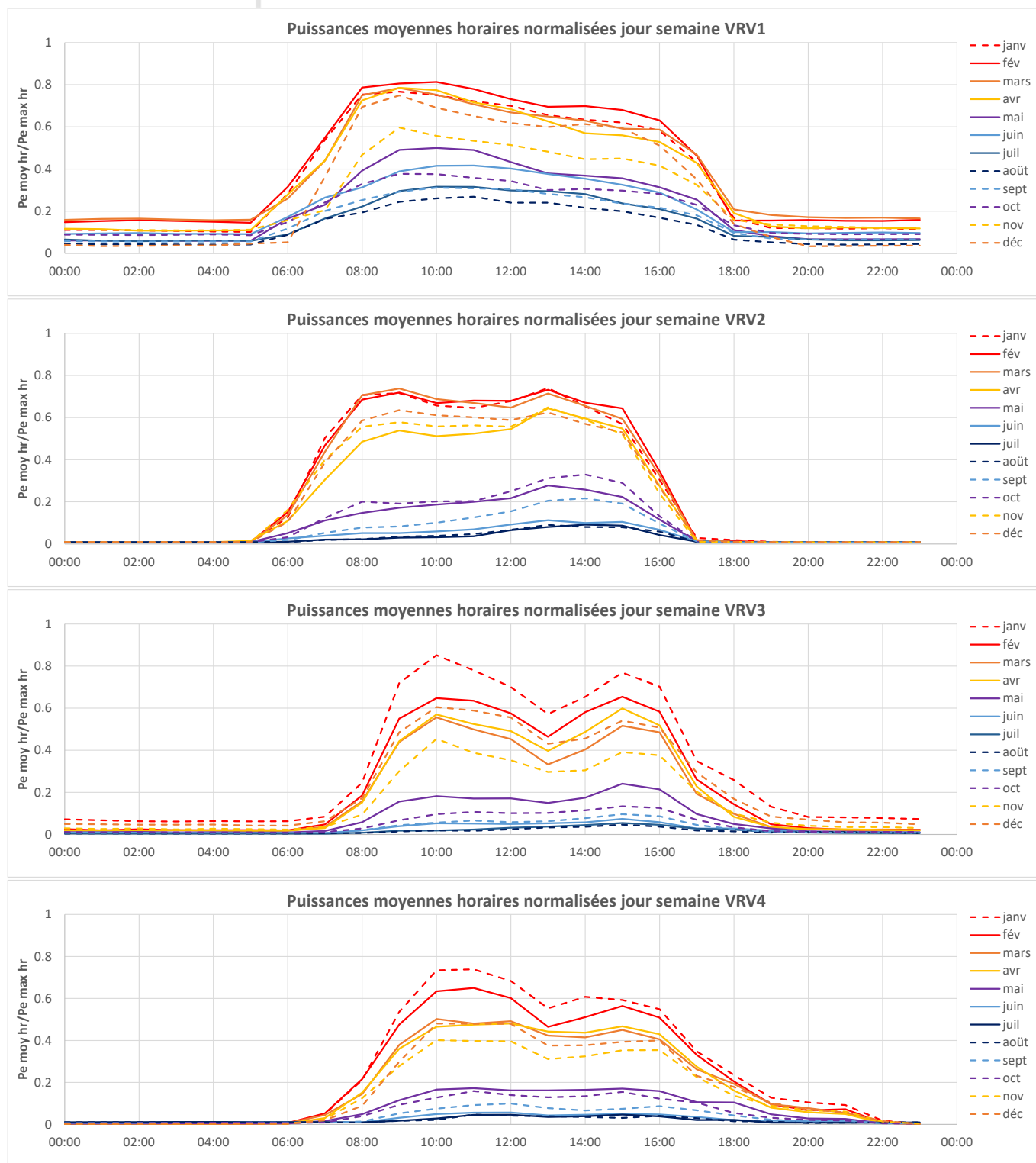


Figure 15 : Puissances horaires UE moyennées sur tous les jours de semaine de chaque mois pour les 4 sites

On observe que :

- La différence entre période d'occupation (horaires variables selon les sites) et la nuit est clairement visible sur tous les sites. Cependant, la puissance tombe vraiment à 0 uniquement sur VRV2 et VRV4 pour lesquels les unités extérieures sont coupées tous les soirs de manière automatique, tandis qu'une consommation

résiduelle subsiste par moments sur VRV1 et VRV3 lorsque certains usagers ne coupent pas leurs unités intérieures.

- La saisonnalité est très marquée sur VRV2, VRV3 et VRV4 avec une différence d'un facteur 4 entre l'été et l'hiver. La différence est moins marquée sur VRV1.

3. Bilan énergétique sur les sites étudiés

a. Consommations spécifiques

Pour permettre la comparaison des sites entre eux, nous avons regroupé les consommations électriques spécifiques des équipements de climatisation sur les 4 sites dans le Tableau 6.

Tableau 8 : Consommations spécifiques d'électricité dédiée à la climatisation sur les 4 sites VRV

Réunion		VRV1	VRV2	VRV3	VRV4
Profil climatisation		pas de coupure	coupure VRV (UE+UI) nuits et we, 365 jrs/an	pas de coupure	coupure UE nuits et we, 365 jrs/an
Conso annuelle électricité VRV	kWhe/m ² /an	49	24	39	19
unités extérieures	kWhe/m ² /an	38.7	16.8	35.4	15.9
unités intérieures	kWhe/m ² /an	10.0	6.9	3.6	3.3
	%	21%	29%	9%	17%

en italique : valeurs estimées

On constate que :

- La demande électrique pour la climatisation varie entre 19 kWh/m² climatisé/an (VRV4 avec coupure en inoccupation) et 49 kWh/m² climatisé/an (VRV1 en fonctionnement 24h/24 365 jrs/an). *NB : Les températures ambiantes observées sont proches sur les 4 sites d'études (cf. §III.1.c).*
- La consommation d'électricité nécessaire à la production de froid (UE) varie entre 16 et 39 kWhe/m² climatisé/an, celle liée à la diffusion de froid (UI) entre 3 et 10 kWhe/m² climatisé/an. *NB : L'estimation de la consommation des UI n'est pas aussi précise que celle des UE car pour des raisons pratiques, on ne peut instrumenter qu'un échantillon dont on n'est pas sûr qu'il soit représentatif...*

b. Consommations en inoccupation

Le Tableau 7 présente les consommations de la climatisation en période d'inoccupation (nuits et we) :

Tableau 9 : Part de consommation de la climatisation en période d'inoccupation pour les 4 sites

Réunion	VRV1	VRV2	VRV3	VRV4
Electricité	33%	17%	23%	20%
<i>dont UE</i>	<i>29%</i>	<i>8%</i>	<i>21%</i>	<i>14%</i>
<i>dont UI*</i>	<i>47%</i>	<i>40%</i>	<i>50%</i>	<i>53%</i>

*sur échantillon mesuré

On constate que :

- La part de consommation de la climatisation VRV en inoccupation n'est pas négligeable, entre 15 et 30% selon les sites.
- La consommation des UE sur VRV2 et VRV4 (où elles sont coupées le soir) réduit grandement leur consommation en inoccupation (mais pas totalement à cause des consommations de veille des équipements) par rapport à VRV1 et VRV3.

veille non négligeable.

- La consommation des UI en inoccupation est relativement semblable d'un site à l'autre (entre 40 et 50%), et ce même lorsque les UI sont coupées de manière centralisée le soir (comme sur VRV2), à cause d'une consommation de

IV. COMPARAISON ENTRE LES DEUX TECHNOLOGIES

1. Performances respectives

Etant donné que les SEER des VRV ne peuvent être mesurés, seule la « mise en œuvre » des technologies peut être comparée par le biais des consommations spécifiques annuelles en électricité des deux types d'installations. *NB : pour être comparables, les valeurs doivent intégrer toutes les consommations liées à la climatisation (à savoir production EG, distribution EG et terminaux pour les GEG, unités extérieures et intérieures pour les VRV).*

Le Tableau 9 et la Figure 17 présentent les données obtenues sur les 8 sites d'étude à La Réunion :

Tableau 10 : Consommation électrique spécifiques liées à la climatisation pour les 4 sites GEG et le 4 sites VRV en kWh/m² climatisé/an

	GEG1	GEG2	GEG3	GEG4	moyenne	
					globale	365 jr/an / coupure inoccupation
Conso élec globale climatisation* (kWh/m ² climatisé/an)	35	32	23	43	30	28
Période de climatisation	toute l'année	coupure mi-juin à fin novembre	toute l'année	fin mai à début novembre		cas le plus courant
Profil de climatisation	coupure GEG nuits et we	coupure GEG et VC nuits, we, vacances	coupure GEG nuits et we	24h/24		

* prod EG + distrib EG + terminaux

	VRV1	VRV2	VRV3	VRV4	moyenne	
					globale	365 jr/an / coupure inoccupation
Conso élec globale climatisation* (kWh/m ² climatisé/an)	49	24	39	19	32	21
Période de climatisation	toute l'année	toute l'année	toute l'année	toute l'année		cas le plus courant
Profil de climatisation	24h/24	coupure UE et UI nuits et we	24h/24	coupure UE nuits et we		

* unités extérieures + unités intérieures

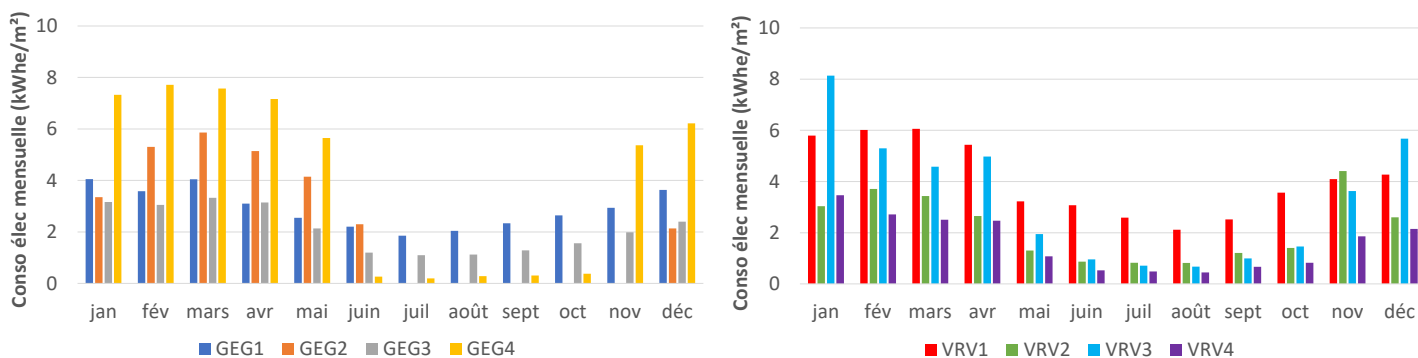


Figure 16 : Consommation électriques mensuelles des 4 sites GEG (gauche) et des 4 sites VRV (droite) en kWh/m² climatisé

On constate que :

- En moyenne globale sur les 4 sites, on ne note pas de différence significative entre les deux technologies (de l'ordre de 30 kWhe/m² climatisé/an)
- Si on considère uniquement les sites avec le profil de consommation le plus courant (climatisation toute l'année avec coupure en inoccupation), **les systèmes VRV ont un léger avantage sur les systèmes GEG (25% de conso en moins)**. NB : Ce résultat reste cependant à confirmer car les moyennes sont effectuées sur 2 sites seulement pour chaque technologie... Cela s'explique probablement par le fait que les systèmes VRV fonctionnent à détente directe et n'ont donc pas besoin d'auxiliaires (qui consomment de l'énergie) pour fonctionner. D'autre part, l'influence du taux de charge sur les performances est notoirement beaucoup plus faible pour les VRV que pour les GEG (à cause du poids des auxiliaire notamment).

2. Caractéristiques d'utilisation de chaque technologie

	GEG	VRV
Investissement	L'investissement de départ est lourd à cause : - du prix intrinsèque de l'équipement de production - des contraintes hydrauliques (nécessité de tirer des réseaux d'eau glacée jusqu'à chaque preneur) => Taille critique pour que la technologie soit pertinente économiquement	Les coûts d'installation sont plus abordables, ce qui les rend plus accessibles pour les installations de petite taille.
Fluide frigorigène	La fluide frigorigène est cantonné à l'intérieur du GEG ce qui fait que les quantités en jeu sont faibles.	Le fluide frigorigène doit circuler dans tout le bâtiment (puisque l'évaporation se fait localement dans chaque bureau) ce qui nécessite de grandes quantités de fluide frigorigène. => Technologie peu adaptée aux grandes surfaces climatisées pour lesquelles les coûts en fluide (au départ mais surtout en cas de fuite) peuvent vite devenir démesurés. De plus la plupart des fluides frigorigènes à faible GWP sont inflammables , ce qui ajoute un risque lorsqu'ils circulent à l'intérieur d'un bâtiment.
Performances	Les performances sont pénalisées par la nécessité d'avoir des auxiliaires (pompes) pour que l'installation puisse fonctionner.	Le fonctionnement à détente directe est intrinsèquement plus performant que le fonctionnement des GEG.
Flexibilité d'utilisation	La variation de la charge se traduit par des cycles de marche/arrêt d'autant plus nombreux que la charge est faible. D'autre part, la coupure à distance des terminaux doit être gérée par un dispositif de commande dédié (GTC).	Les unités de production ont une variation de puissance intégrée (technologies "inverter"). Les VRV sont généralement équipés d'une supervision permettant la commande centralisée des unités extérieures mais aussi intérieures.
Taux de charge	Le taux de charge a un impact important sur les performances (notamment si <10%) à cause du poids des auxiliaires qui ont une consommation fixe même lorsque la production de froid est faible.	Le taux de charge influence peu les performances (qui sont même parfois meilleures à charge partielle).

En conclusion, aucune des deux technologies ne surpasse l'autre, elles ont des caractéristiques différentes qui rendent leur utilisation plus adaptée dans certaines situations que dans d'autres. De manière générale :

- **Les GEG nécessitent une taille critique** à cause du poids de l'investissement, généralement on parle d'une **surface climatisée >1000 m²**.
- Les VRV nécessitent de grandes quantités de fluide frigorigène, **ne pas négliger le risque de dérapage des coûts d'exploitation à terme** (quand les fuites apparaîtront) notamment en lien avec les restrictions grandissantes d'utilisation des fluides frigorigène (et le risque d'explosion des prix qui va avec). **Ce qui les rend plutôt adaptées aux petites surfaces climatisées (<quelques centaines de m²)**.
- **La question se pose pour les sites de taille intermédiaire pour lesquels les deux technologies peuvent être pertinentes...**